

Oskari Piispa

# Verkkoon kytketyn aurinkosähköjärjestelmän vaikutukset sähköverkonasentajien työturvallisuuteen

Opinnäytetyö  
Sähkö- ja automaatiotekniikka

2017



**Kaakkois-Suomen  
ammattikorkeakoulu**

Tekijä	Tutkinto	Aika
Oskari Piispa	Insinööri (AMK)	Joulukuu 2017
<b>Opinnäytetyön nimi</b>  Verkkoon kytketyn aurinkosähköjärjestelmän vaikutukset sähköverkonasentajien työturvallisuuteen		
<b>Toimeksiantaja</b>  Vantaan Energia Sähköverkot Oy		
<b>Ohjaaja</b>  Juha Korpijärvi ja Antti Raassina		
<b>Tiivistelmä</b>  <p>Opinnäytetyössä tutkittiin sähköverkkoon kytkettyjen aurinkosähköjärjestelmien vaikutusta verkonasentajien työturvallisuuteen. Työssä selvitettiin myös järjestelmien paloturvallisuutta. Aurinkosähköjärjestelmä poikkeaa muista tyypillisistä sähköverkkoon kytketyistä järjestelmistä kahdella eri tavalla; se tuottaa sähköä myös jakeluverkkoon päin ja sen tuotanto on suoraan verrannollinen auringon säteilyn määrään.</p> <p>Sähköverkon asentajat työskentelevät pääsääntöisesti jännitteettömissä kohteissa. Jos lähialueen verkkoon on kytketty aurinkosähköjärjestelmä, on olemassa riski, että jännitteetön kohde tulee järjestelmän takia uudelleen jännitteelliseksi. Aurinkosähköjärjestelmien toimintaa tulipalotilanteessa on myös pidetty erityisenä turvallisuusongelmana. Aurinkopaneelit tuottavat sähköä aina, kun niihin kohdistuu auringon säteilyä. Sähkökatkonkin aikana aurinkopaneelistossa voi olla 200 - 1000V tasajännite.</p> <p>Aurinkosähkön suosio on kasvanut viime vuosina valtavasti. Mitä enemmän pientuotantoa asennetaan, sitä suurempi mahdollisuus sen on aiheuttaa työturvallisuusriskejä tai muita ongelmia verkkoon. Työn tavoitteena oli tutkia aurinkosähköjärjestelmiin liittyviä riskejä ja niihin asennettavien turvajärjestelmien riittävyyttä. Paloturvallisuuden osalta päätavoitteena oli selvittää, mitä todellisia riskejä järjestelmiin liittyy ja miten ne ovat ehkäistävissä. Tutkimuksessa hyödynnettiin alan kirjallisuuden lisäksi useita haastatteluja.</p> <p>Aurinkosähköjärjestelmissä käytettävät invertterit ovat oikein asennettuna erittäin turvallisia ja pystyvät ehkäisemään sähköverkon asentajiin liittyvät takasyötön vaarat. Vaikka invertterin suojaustoiminnot pettäisivät, on järjestelmissä aina erillinen erotuskytkin, jolla työturvallisuus voidaan taata. Jännitteettömyys pitää silti aina todeta ja työkohte mahdollisuuksien mukaan maadoittaa. Pientuotannon kasvaessa voi verkkoon aiheutuvat häiriöt tulla mahdollisiksi ja niihin on varauduttava etukäteen. Paloturvallisuus järjestelmien kohdalla on lähtökohtaisesti hyvällä tasolla, mutta siitä löytää vielä parannettavaa. Pelastushenkilökunnan kouluttaminen käsittelemään järjestelmiä olisi erittäin tärkeää.</p>		
<b>Asiasanat</b>  Työturvallisuus, aurinkopaneelit, hajautettu energiantuotanto, aurinkoenergia, paloturvallisuus		

Author	Degree	Time
Oskari Piispa	Bachelor of electrical engineering	December 2017
<b>Thesis Title</b>		40 pages 1 page of appendices
Grid connected photovoltaic systems effects on grid employees work safety		
<b>Commissioned by</b>		
Vantaan Energia Sähköverkot Oy		
<b>Supervisor</b>		
Juha Korpijärvi ja Antti Raassina		
<b>Abstract</b>		
<p>The thesis studied the impact of grid connected photovoltaic systems on the grid employees' labor safety and also the fire safety of the systems. A photovoltaic system differs from a regular grid connected electric device. It can produce electricity and feed it back to the grid, but it is also dependent on solar energy.</p> <p>If a photovoltaic system is connected to the grid, there is a risk that it will start feeding the grid even though it is supposed to be dead, which can cause a major safety risk for grid employees. Another risk involves firemen, because there may be lethal DC-voltage in the system even when it is disconnected from the grid.</p> <p>Photovoltaic systems have greatly increased their popularity in Finland over the past few years. As the number of installed systems increases, so does the risks involved. The goal of this thesis was to study the risks and the different safety mechanisms involving photovoltaic systems.</p> <p>The thesis succeeded to prove that grid employees' labor safety is at a good level and the risks are minimal. However the increasing number of photovoltaic systems may cause problems for the grid in the future. Fire safety is at an average level, even though some improvements could be made. Instructing firemen on photovoltaic systems would be the most important of them.</p>		
<b>Keywords</b>		
Work safety, solar panels, distributed generation, solar energy, fire safety		

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	AURINKOPANEELI .....	7
2.1	Aurinkokenno.....	7
2.2	Yksikiteiset paneelit .....	8
2.3	Monikiteiset paneelit .....	9
2.4	Ohutkalvopaneelit .....	10
3	VERKKOON KYTKETTY AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄ.....	11
3.1	Aurinkosähköjärjestelmät.....	11
3.2	On grid -järjestelmän rakenne.....	11
3.3	Akustot on grid -järjestelmissä .....	12
3.4	Aurinkosähköjärjestelmien akut .....	13
4	INVERTTERIT .....	14
4.1	Vaihtosuuntaaja .....	14
4.2	Saarekekäytön esto .....	15
4.3	Saarekekäyttö .....	16
4.4	MPPT .....	17
4.5	Invertterien asennus Suomessa .....	19
4.6	String invertterit.....	19
4.7	Mikroinvertterit .....	21
5	SÄHKÖVERKON TYÖTURVALLISUUS.....	22
5.1	Takasyöttö .....	22
5.2	Takasyötön riskin minimoiminen.....	23
5.3	Haittavaikutukset sähköverkkoon .....	24
5.4	Sähköverkon suojausongelmat.....	25
5.5	Verkkokoodi.....	26
5.6	Luvattomasti verkkoon kytketty järjestelmä .....	28
5.7	Haastattelut .....	28

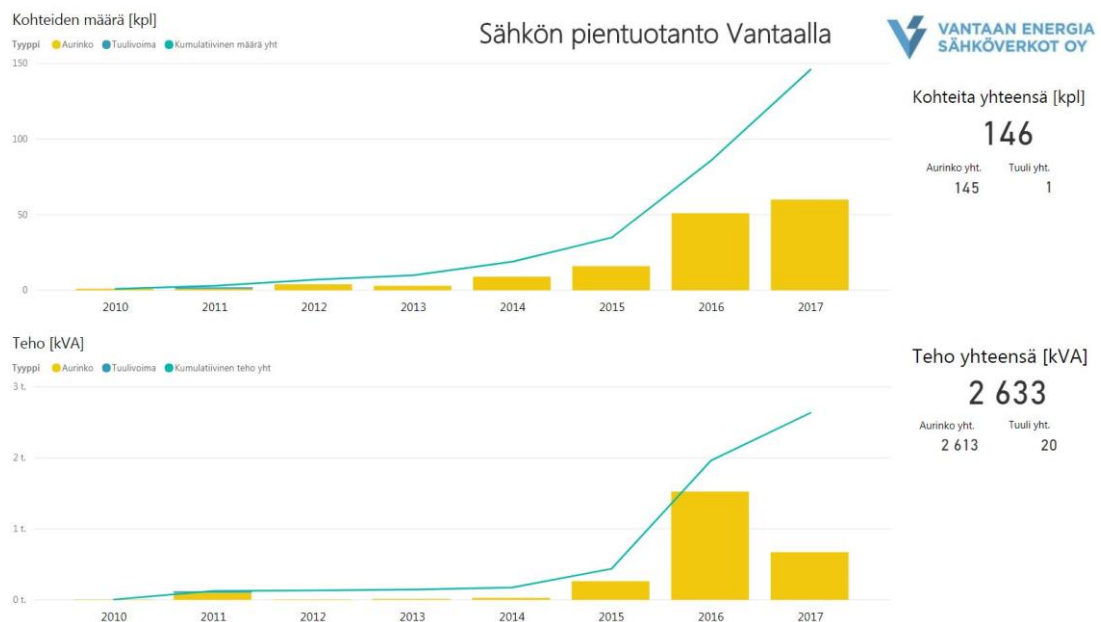
6	PALOTURVALLISUUS .....	29
6.1	Aurinkopaneelien jatkuva jännite .....	30
6.2	DC-turvakytkin .....	30
6.3	PVStop .....	31
6.4	Paneeliston erottimet .....	32
6.5	DC-valokaaret .....	34
7	KEHITYSIDEAT .....	36
8	POHDINTA .....	37
	LÄHTEET .....	38
	LIITTEET	

Liite 1. Haastattelukysymykset

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyössä tutkitaan pientuotannon aiheuttamia työturvallisuusriskejä sähköverkon asentajille. Vantaalla aurinkosähkön osuus käsittää yli 99 prosenttia pientuotannosta, jonka takia työssä tutkitaan vain verkkoon kytkettyjen aurinkosähkölaitteiden aiheuttamia turvallisuuskysymyksiä. Pientuotannon tarkoitetaan alle 2MVA:n tuotantolaitoksia. Opinnäytetyössä selvitetään myös aurinkosähkön aiheuttamia paloturvallisuusriskejä ja mahdollisia tapoja valmistautua niihin.

Globaalisti aurinkosähkön asennettu kapasiteetti oli arviolta noin 320GWp vuoden 2016 loppuun mennessä. Määrä vastaa tilastollisesti likimain 1,3 prosenttia globaalista sähkönkulutuksesta. Vuoden 2015 veropäätöksen myötä aurinkosähkölaitteiden rakentaminen lähti nousuun myös Suomessa, mikä on nähtävissä myös Vantaalle asennetuista aurinkosähkölaitteista (kuva 1). Koko Suomen tasolla aurinkosähkön kokonaiskapasiteetin ennustetaan ylittävän 40MWp vuoden 2017 lopulla. (Mäkinen 2017b, 1-2.)



Kuva 1. Sähkön pientuotanto Vantaalla lokakuussa 2017 (Raassina 2017)

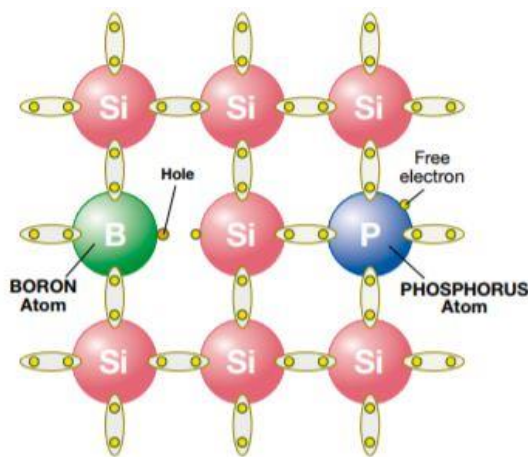
Aurinkosähkölaitteiden huomattavan kasvun myötä on syytä tutustua tarkemmin niiden tuomiin riskeihin. Kun järjestelmät lisääntyvät, myös niiden aiheuttamien poikkeustilanteiden todennäköisyys lisääntyy. Pientuotanto voi aiheuttaa verkkoon myös häiriöitä, jotka voivat korostua, kun verkkoon kytkettyjen järjestelmien määrä kasvaa.

## 2 AURINKOPANEELI

### 2.1 Aurinkokenno

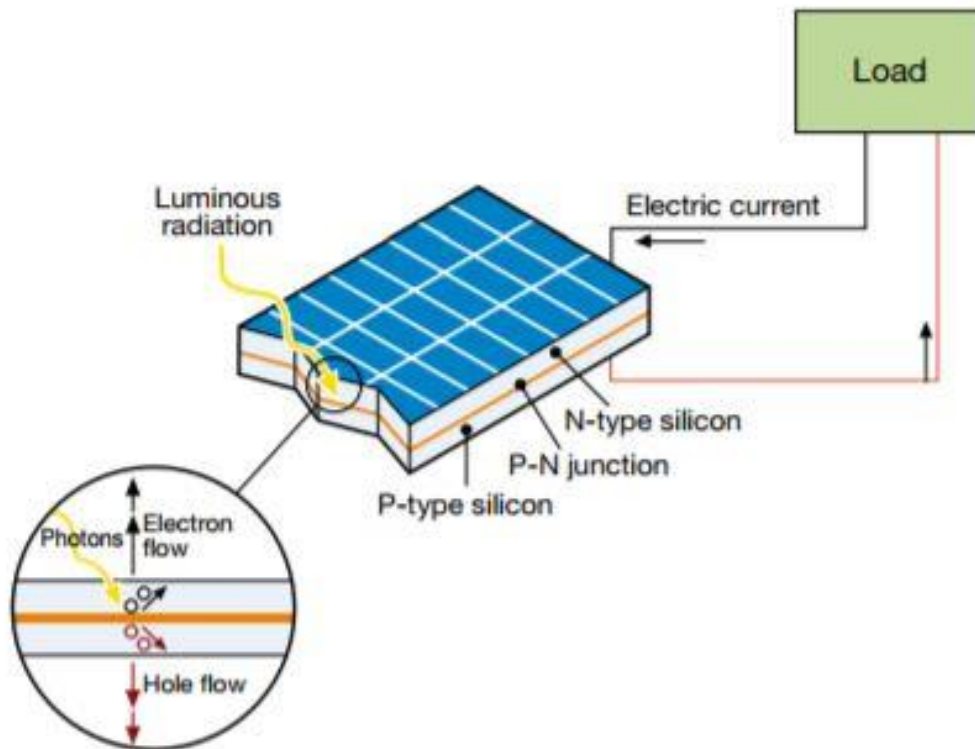
Aurinkokennot muuttavat auringon säteilyn sähköksi valosähköisen ilmiön avulla (Käpylehto 2016, 52-53). Yksi kenno tuottaa vajaan 0,6 voltin jännitteen, ja tehokkaassa auringonpaisteessa, jopa 35 milliampeerin virran jokaiselta neliösenttimetriltä. Toisin sanoen tyypillinen 156mm x 156mm kenno voi tuottaa noin 8,5 ampeerin virran. (Perälä 2017, 42.)

Aurinkokennot valmistetaan piistä (Si), joka on maankuoren toiseksi yleisin alkuaine. Valmistus tapahtuu vyöhykesulatusmenetelmällä: eli murskatusta kvartsista poistetaan epäpuhtaudet kuumentamalla. Aurinkokennoissa käytävään piihin seostetaan lisäaineita, joilla muutetaan puolijohteen ominaisuuksia. Esimerkiksi p-tyyppinen osa voidaan tehdä seostamalla booria (B) ja n-tyyppinen osa seostamalla fosforia (P) (kuva 2).



Kuva 2. Esimerkki aurinkokennon kemiallisesta rakenteesta (Technical Application Papers No.10 Photovoltaic plants 2010, 8)

Auringon säteilyn sisältämät fotonit muodostavat puolijohteeseen osuessaan elektroni-aukko-pareja. Kennon läpi kytketään erillinen johdin, jolloin muodostuu virtapiiri ja kenno alkaa tuottaa sähköä (kuva 3). (Technical Application Papers No.10 Photovoltaic plants 2010, 8.)



Kuva 3. Aurinkokennon sähköntuotanto (Technical Application Papers No.10 Photovoltaic plants 2010, 8)

## 2.2 Yksikiteiset paneelit

Markkinoiden ensimmäiset aurinkopaneelit olivat yksikiteisiä (Perälä 2017, 43). Yksikiteisten paneelien kennot valmistetaan nimensä mukaan yhdestä piikiteestä. Puolijohteen kiderakenne on yhtenäinen, jonka ansiosta ne omaavat hyvän hyötysuhteen: 16 - 25 prosenttia. Yksikiteiset paneelit ovat herkempiä varjostuksille; esimerkiksi yksi paneelin päälle tippunut lehti vaikuttaa koko järjestelmän tuotantotehoon. (Käpylehto 2016, 57-58.) Paneeleihin on asennettava ohitusdiodi, joka ehkäisee varjostusongelman (Perälä 2017, 44). Nykyään käytännössä kaikissa uusissa paneeleissa on valmiina ohitusdiodi hyötysuhteen parantamiseksi (Jokinen 2017).

Paneelien valmistuksessa sahataan yksikiteisestä piistä neliön muotoisia kiekkoja, joissa on vain pieni pyöristys kulmissa. Muotoilulla hyödynnetään mahdollisimman suuri aktiivinen pinta-ala (kuva 4).





Kuva 4. Yksikiteinen aurinkopaneeli (*Technical Application Papers No.10 Photovoltaic plants 2010, 12*)

Kiekot kootaan riveihin alustalevyille, joka on yleensä komposiittia. Kennot kytketään sarjaan. (Käpylehto 2016, 57-58; Perälä 2017, 29-46.)

### 2.3 Monikiteiset paneelit

Monikiteiset paneelit ovat valmistuskustannuksiltaan edullisempia kuin yksikiteiset ja ovatkin yleistyneet valtatyyppiä – pienemmästä hyötysuhteestaan (16 - 19 prosenttia) huolimatta (Perälä 2017, 43-44).

Ne valmistetaan kaatamalla useista piikiteistä sulatettua massaa muottiin, jonka jälkeen se jäähtyy ja kiteytyy uudelleen. Valmiista levystä voidaan leikata juuri sopivan kokoisia kennoja (kuva 5), joten koko paneelin pinta-ala voidaan käyttää hyödyksi, eikä valmistuksessa synny niin paljon hävikkiä. Paneelin kokoonpano tapahtuu samalla tavalla kuin yksikiteisissä, eli kytkemällä useita kennoja sarjaan.

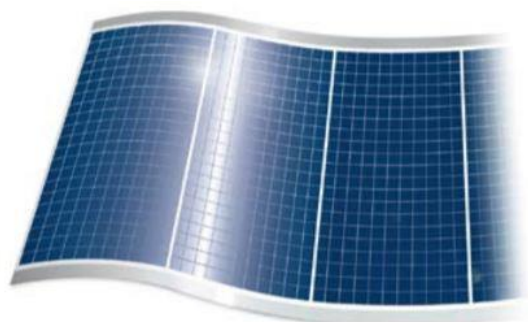


Kuva 5. Monikiteinen aurinkopaneeli (*Technical Application Papers No.10 Photovoltaic plants 2010, 12*)

Useiden kiteiden käytöstä johtuvien epäsymmetrisyyksien takia, monikiteisen paneelin hyötysuhde on pienempi kuin yksikiteisillä, mutta varjostukset eivät alenna paneelin tuottoa niin paljoa. (Käpylehto 2016, 57-58; Polycrystalline Silicon Cells: production and characteristics 2012.)

## 2.4 Ohutkalvopaneelit

Yksi- ja monikiteisten paneelien teknologia on vakiintunutta ja noin 90% valmistetaan näillä menetelmillä (Technical Application Papers No.10 Photovoltaic plants 2010, 13). Ohutkalvopaneelit ovat huomattavasti edullisempi vaihtoehto ja niitä voi asentaa hankaliinkin kohteisiin taipuisuutensa takia (kuva 6). Ohutkalvopaneeleita valmistetaan pääasiassa amorfisesta, eli ei-kiteisestä piistä, mutta sen lisäksi myös muistakin materiaaleista: esimerkiksi CdTe-kennot tehdään kadmiumista ja telluurista. (Perälä 2017, 43-45.)



Kuva 6. Monikiteinen aurinkopaneeli (Technical Application Papers No.10 Photovoltaic plants 2010, 13)

Ohutkalvopaneelien valmistuksessa lisätään tekniikasta riippuen 2 – 20  $\mu\text{m}$  paksu kerros puolijohdemateriaalia edulliselle materiaalille, esimerkiksi lasin tai muovin päälle. Ohutkalvopaneelien hyötysuhde on vain 9 – 13 prosenttia, eikä niiden käyttöikä ole yleensä kuin muutamia vuosia. Edullisen valmistustavan ja vähäisen puolijohdemateriaalin tarpeen takia, ohutkalvokennoja kehitetään jatkuvasti ja niiden tulevaisuuden näkymät ovat hyvät. (Käpylehto 2016, 27-28; Perälä 2017, 43-45.)

### **3 VERKKOON KYTKETTY AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄ**

#### **3.1 Aurinkosähköjärjestelmät**

Off grid -järjestelmällä tarkoitetaan sähköverkon ulkopuolella tapahtuvaa tuotantoa. Tyypillisessä järjestelmässä energia varastoidaan akkuihin ja niiden kautta kulutukseen.

On grid -järjestelmä tarkoittaa sähköverkkoon liitettyä aurinkosähköjärjestelmää. Aurinkopaneelit kytketään vaihtosuuntaajaan, eli invertteriin, joka muuttaa paneelien tuottaman tasavirran (DC) sähkö- ja kiinteistöverkkoon sopivaksi vaihtosähköksi (AC). Järjestelmä mitoitetaan niin, että mahdollisimman suuri osa tuotetusta sähköstä menee kulutukseen, koska sähköverkkoon myydystä energiasta saatu korvaus on Suomessa lähtökohtaisesti alhainen. (Tahkokorpi 2016, 135-144; Käpylehto 2016, 43, 72, 96-97.)

#### **3.2 On grid -järjestelmän rakenne**

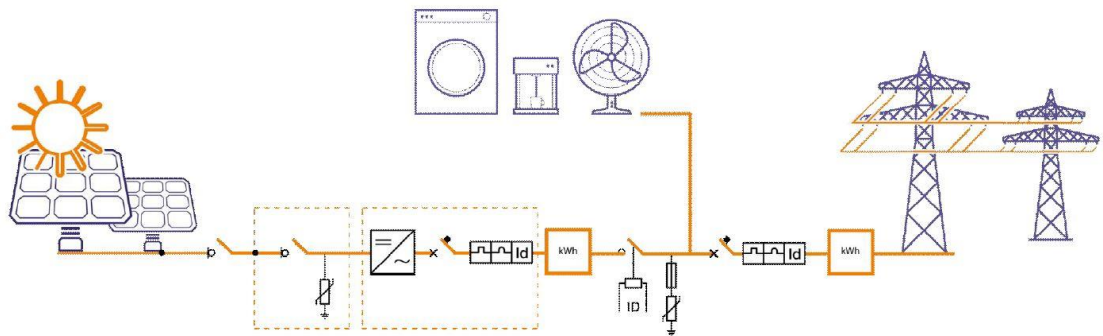
Suomessa asennetuista aurinkosähköjärjestelmistä suurin osa asennetaan katoille (Tahkokorpi 2016, 179). Suuremmissa järjestelmissä varsinkin tasakattoasennukset ovat yleistyneet Suomessa, joista voi käyttää esimerkkinä Postin terminaalien kattoja Vantaalla (Jokinen 2017).

Tyypillinen pientaloihin asennettava järjestelmä on teholtaan 3000 piikkiwattia ja siihen sisältyy 12 paneelia. Aurinkopaneelit asennetaan Suomessa käytännössä aina kiinteinä asennuksina. Parempi hyötysuhde voidaan saavuttaa aurinkoa seuraavalla asennuksella, mutta ne ovat Suomessa erittäin harvinaisia. Niiden hankintakustannukset ovat huomattavasti suuremmat, eivätkä ne pysty hyödyntämään hajasäteilyä niin hyvin. (Tahkokorpi 2016, 179-182.)

Niin pienissä kuin isoissakin verkkoon kytketyissä aurinkosähköjärjestelmissä on samoja rakenteita: aurinkopaneelit, asennustelineet, DC-kaapeloinnit, invertterit ja turvakytkimet löytyvät käytännössä kaikista järjestelmistä. Suurimassa osassa nykyaikaisista järjestelmistä käytetään invertterien yhteydessä myös sulakkeita sekä vikavirtasuojia. Aurinkosähköjärjestelmä ei kuitenkaan

välttämättä toimi suunnitellulla tavalla, jos vikavirtasuojaus on henkilösuojauksen tasolla, eli 30 mA. Tästä syystä ne ovat yleensä esimerkiksi 300 mA, eli palosuojauksen tasolla. (Mäkinen 2017b, 5-6.)

Kuvan 7 esimerkissä havainnollistetaan verkkoon kytketyn aurinkosähköjärjestelmän eri komponentteja ja suojauksia. Katkoviivojen sisällä on vasemmalta katsottuna ensimmäisessä laatikossa DC-turvakytkin ja seuraavassa laatikossa vaihtosuuntaaja, AC-kytkin ja suojaukset.



Kuva 7. Rakennuksen sähköjärjestelmään liitetyn aurinkosähkövoimalan periaatekuva (Mäkinen 2017b, 5)

### 3.3 Akustot on grid -järjestelmissä

On grid -järjestelmissä käytetyt akut ovat Suomessa harvinaisia. Naps Solar Systems Oy:n Juha Majurin arvion mukaan akustollisia järjestelmiä olisi Suomessa tällä hetkellä korkeintaan muutamia kymmeniä. Aurinkosähköjärjestelmä ei tarvitse akkuja toimiakseen ja ne nostavat hankintakustannuksia huomattavasti. Ne myös kuluvat ja niitä joutuu uusimaan, joka täytyy ottaa huomioon kustannuksia laskiessa. Akkujen tuomien lisäkustannuksien takia niiden käyttö verkkoon kytketyissä järjestelmissä ei tällä hetkellä taloudellisesti kannata Suomessa.

Akkujen hinnat ovat kuitenkin laskussa, johon esimerkiksi sähköautojen yleistyminen on vaikuttanut. Hintojen laskemisen ja teknologian kehittymisen takia, voi akkujen käyttö olla tulevaisuudessa erittäin yleistä myös verkkoon kytketyissä aurinkosähköjärjestelmissä. Juha Majuri arvioi, että Naps Solar Systems Oy:n käyttämät akut olisivat rahallisesti kannattavia kymmenen vuoden kuluttua. (Majuri 2017; Käpylehto 2016, 44-45, 80-82; Tahkokorpi 2016, 136, 152-153.)

Jos kohteessa halutaan optimoida tuotetun sähkön käyttö, voidaan akustolla edesauttaa asiaa huomattavasti. Päivällä auringon paistaessa varataan akku täyteen, ja illalla kun tuotantoa ei ole, käytetään akkuun varastoitu energia. Kyseinen vaihtoehto on erityisesti Saksassa yleistynyt, jotta aurinkosähkön-tuottaja täyttäisi uudet syöttötariffiehdot, mutta myös valtion investointitukien takia. (Käpylehto 2016, 44-45, 80-82; Tahkokorpi 2016, 136, 152-153.) Jälkimmäisiin Suomessa voi verrata kotitalousvähennystä, tosin Suomessa kuluttaja ei saa muuta tukea aurinkosähköön, kuin verovähennykset asennustyön osalta. Suurille teollisille voimaloille on kuitenkin mahdollista saada 25 prosentin investointituki. (Jokinen 2017.)

Tarkastellaan esimerkkinä Naps Solar Systems Oy:n vaihtoehtoa akustolle. Naps kotiakku toimii täysin erillään aurinkosähköjärjestelmästä, jonka takia akuston kanssa voidaankin käyttää mitä vain aurinkosähköjärjestelmää. Akku-järjestelmässä on erilliset virtamittarit, joilla mitataan järjestelmän tuotantoa, sekä kohteen sähkönkulutusta. Naps kotiakku ohjaa toimintaansa mitattuihin suureihin perustuen. Toisin sanoen; akkuja ladataan, kun tuotanto ylittää kulu-tuksen, ja puretaan kun tilanne on päinvastainen. Naps kotiakun käyttämästä akustosta on saatavilla myös hybridimalli, johon aurinkosähköjärjestelmä voi-daan kytkeä suoraan, vastaavia järjestelmiä on myös muilla valmistajilla. (Ma-juri 2017.)

### **3.4 Aurinkosähköjärjestelmien akut**

Perinteisesti aurinkosähköjärjestelmissä käytetään lyijyakkuja, mutta litiumio-niakut ovat yleistymässä (Tahkokorpi 2016, 154-155). Esimerkiksi sähköau-toistaan tunnettu Tesla on lanseerannut Powerwall-litiumioniakun, joka on edullinen vaihtoehto verkkoon kytkettyihin aurinkosähköjärjestelmiin (Perälä 2017, 68).

Kaikkiin energianvarastointiin liittyviin tuotteisiin liittyy riskejä (BU-304a: Safety Concerns with Li-ion 2017). Avoimesta lyijyakusta vapautuu vetyä ja happea, kun se lähestyy täyttä varaustilaa, mikä on myös syy sille, että niihin joudu-taan lisäämään tislattua akkuvettä. Aurinkosähköjärjestelmissä käytetyt lyijy-

akut ovat suljettuja eli huoltovapaita. Niihin ei tarvitse lisätä elinkaarensa aikana akkuvettä, koska latauksen loppuvaiheessa syntynyt happi yhdistyy vedeksi ja palautuu takaisin akkuun. Suljettujen akkujen levyseoksien takia myös vetyä syntyy vähemmän.

Räjähdysherkkiä kaasuja pääsee suljetuissakin akuissa ilmaan ylipaineventtiilin kautta, jos niissä tapahtuu ylilatausta. Lyijyakkujen säilytyspaikan riittävästä tuuleutuksesta onkin tärkeä huolehtia myös suljettujen akkujen käytössä. Lyijy-akku voi myös oikosulikutapauksessa muodostaa valokaaren, joka on merkittävä paloturvallisuusriski. (Tahkokorpi 2016, 156-157,185.)

Litiumioniakkuja voidaan pitää turvallisempina vaihtoehtona. Ne muun muassa vapauttavat ilmaan käytännössä pelkkää hiilidioksidia. Niiden turvallisuutta on tutkittu paljon, ja voidaankin todeta, että suurin osa ongelmista johtuu valmistusvirheistä tai väärinkäytöstä. Toisaalta litiumioniakkujen valmistuksessa käytetyt puhdistilat eivät välttämättä ole kovin tarkkaan huolehdittuja ja epäpuhtauksilla saastuneita akkuja voi päästä myyntiin. Metalliset epäpuhtaudet voivat aiheuttaa akun kennossa oikosulun, joka voi helposti johtaa koko akkupakan palamiseen. (BU-304a: Safety Concerns with Li-ion 2017.)

Naps kotiakkujärjestelmän akustossa, eli sonnenBatteriessa, käytetään litiumrautaosfaatti kennoja, jotka ovat erittäin turvallisia. Ne eivät normaalisti reagoi oikosulkuun niin rajulla lämpötilan nousulla, että kenno syttyisi palamaan. Sähköautoteollisuudessa yleisesti käytössä olevat litium NMC (nikkeli-mangaani kobolttioksidi) -kennot reagoivat oikosulkuun huomattavasti rajumalla lämpötilan nousulla, jolloin kenno hyvin todennäköisesti syttyy palamaan ja mahdollisesti sytyttää myös viereiset kennot. Huomioitavaa on myös, että vesi voi vain pahentaa tulipalaa litium NMC -akustoissa. (Majuri 2017.)

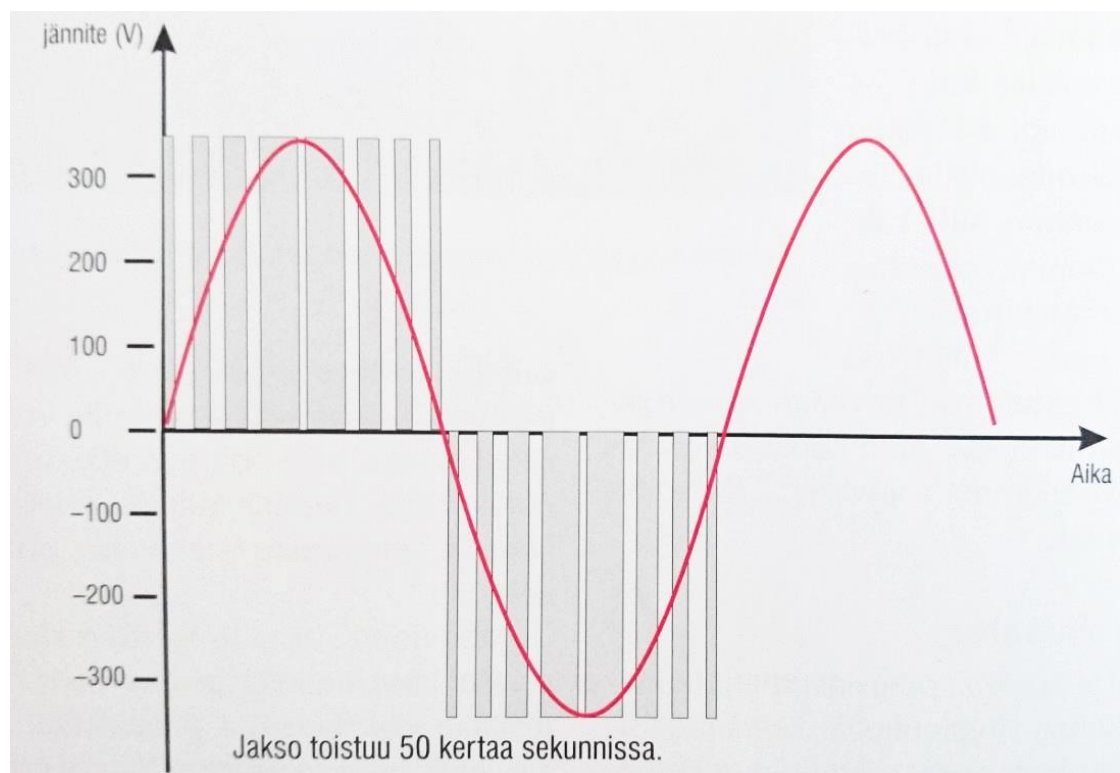
## **4 INVERTTERIT**

### **4.1 Vaihtosuuntaaja**

On grid -aurinkosähköjärjestelmissä käytettävää vaihtosuuntaajaa, voidaan kutsua verkkoinvertteriksi. Se muuttaa aurinkopaneeleilta tulevan tasasähkön

vaihtosähköksi sekä tahdistaa jännitteen verkon taajuuteen, joka on Suomessa 50Hz. (Perälä 2017, 78-79.)

Kuvassa 8 esitetään teoreettisesti vaihtosuuntaajan toimintaperiaate. Tasavirtaa kytketään ja katketaan pulssimaisesti puoliaaltojen aikana useita kertoja. Jännitepulssit pitenevät huippua kohden ja lyhenevät jälleen puoliaallon jännitteen laskiessa. Sama toistuu positiivisella ja negatiivisella puolella, josta muodostuu jakso, joka taas toistuu 50 kertaa sekunnissa ja siten saavutetaan 50Hz:n taajuus.



Kuva 8. Vaihtosuuntaajan toimintaperiaate (Perälä 2017, 76)

## 4.2 Saarekekäytön esto

Invertterien tärkeimpiin ominaisuuksiin kuuluu saarekekäytön esto, eli anti-islanding. Invertteri ei voi toimia ilman sähköverkon referenssitaajuutta ja -jännitettä, joten jos yhteys sähköverkkoon katkeaa, tapahtuu erotus sähköverkosta automaattisesti. Anti-islanding on invertterin toiminto, josta käyttäjä saa useimmissa laitteissa vikakoodin, esimerkiksi: "missing grid" ja sen on toimittava viidessä sekunnissa sähköverkon poiketessa asetteluarvoista.

Lisäksi on asennettava AC-turvakytkin, jolla sähköverkkoyhtiön asentajat voivat mekaanisesti erottaa tuotantolaitteiston verkosta. Kytkin tulee asentaa paikkaan, johon verkkoyhtiöllä on esteetön pääsy. Kytkimestä pitää erotusväli olla tulkittavissa luotettavasti – esimerkiksi selkeällä asennonosoituksella. Turvakytkin pitää olla myös lukittavissa. (Tekninen liite 1 Enintään 100 kVA tuotantolaitoksia koskevat tekniset vaatimukset 2016; Mäkinen 2017b, 4-5.)

### **4.3 Saarekekäyttö**

Aurinkosähköjärjestelmä voidaan myös pitää käynnissä esimerkiksi sähkökatkon aikana, mutta silloin järjestelmä on oltava kaksoiskytkettävä; toisella kytkennällä järjestelmä on yhteydessä sähköverkkoon ja toisella täysin verkosta erotettu saareke (Tekninen liite 1 Enintään 100 kVA tuotantolaitoksia koskevat tekniset vaatimukset 2016).

Saarekekäytön mahdollistama aurinkosähköjärjestelmä on erittäin harvainen, eikä esimerkiksi Naps Solar Systems Oy ole asentanut Suomeen ainuttakaan kyseistä järjestelmää. Jotta järjestelmää voitaisiin käyttää varavoimana, ei tyypillistä verkkoon tahdistuvaa invertteriä voida käyttää, koska ne tarvitsevat aina yhteyden sähköverkkoon toimiakseen. Silloin tulee käyttää verkkoa luovaa invertteriä, joka sisältää siniaaltogeneraattorin ja on täysin verkosta erotettu.

Käytännössä aurinkosähköjärjestelmässä on kuitenkin oltava normaali verkkoon tahdistuva invertteri silloin, kun se toimii sähköverkon kanssa rinnan. Saarekekäytön mahdollistamiseksi onkin järjestelmä varustettava toisella verkkoa luovalla invertterillä, joka toimii täysin verkosta erotettuna. Kaksoiskytkentä tarkoittaakin sitä, että kun yhteys sähköverkkoon katkeaa, kytkeytyy verkkoon tahdistuva invertteri normaalisti viidessä sekunnissa irti verkosta, mutta verkkoa luova invertteri kytkeytyy päälle ja alkaa toimia erillisenä saarekkeena.

Siniaaltogeneraattorin omaavat invertterit ovat kalliita verrattuna tyypillisiin verkkoon tahdistuviin inverttereihin, jonka takia niitä ei yleensä asenneta tavallisiin aurinkosähköjärjestelmiin. Siniaaltogeneraattori voisi olla myös akus-



tossa, mutta tällä hetkellä Suomen tai esimerkiksi Saksan markkinoille suunnatuissa akustoissa sitä ei pääsääntöisesti ole. Varavoimana käytetäänkin jo vakiintunutta UPS (Uninterruptible Power Supply) -teknologiaa, jossa voidaan käyttää esimerkiksi vain akkuja. (Majuri 2017.)

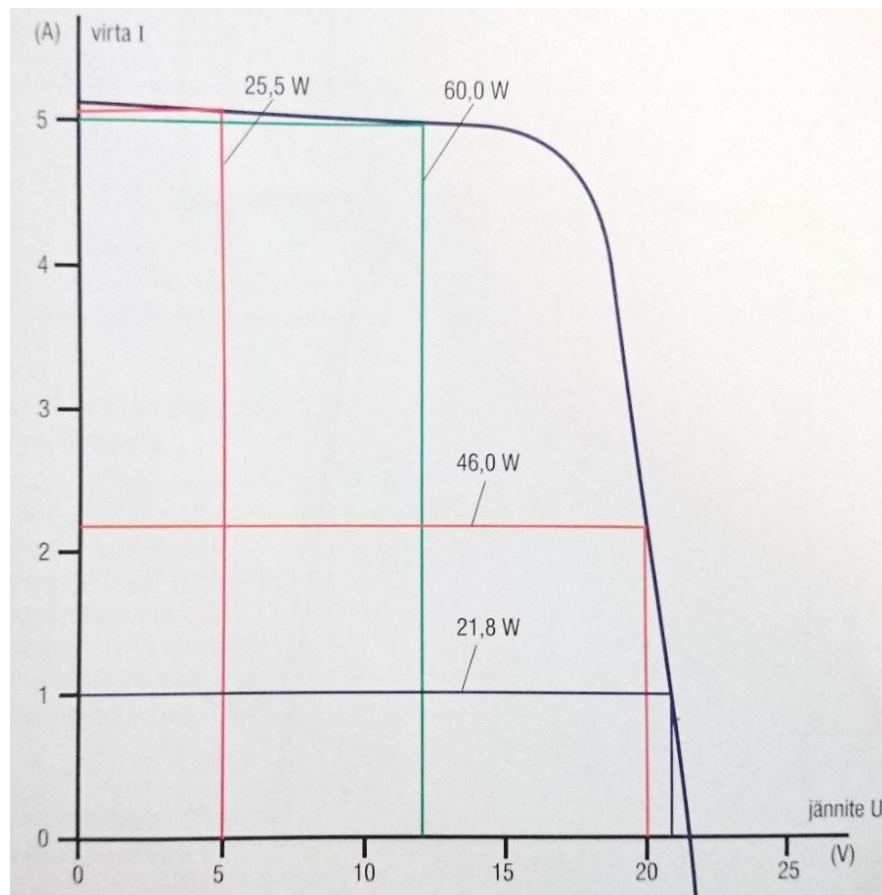
#### 4.4 MPPT

Aurinkopaneelin tehontuotto riippuu sen kuormitusvirrasta, jota voidaan optimoida muuttamalla kuormitusjännitettä. Tarkastellaan kuvan 9 esimerkkiä aurinkopaneelin ominaiskäyrästä. Kuvaajasta lasketaan kolme eri tehoarvoa eri kuormituksilla.

Teho lasketaan kaavalla 1.

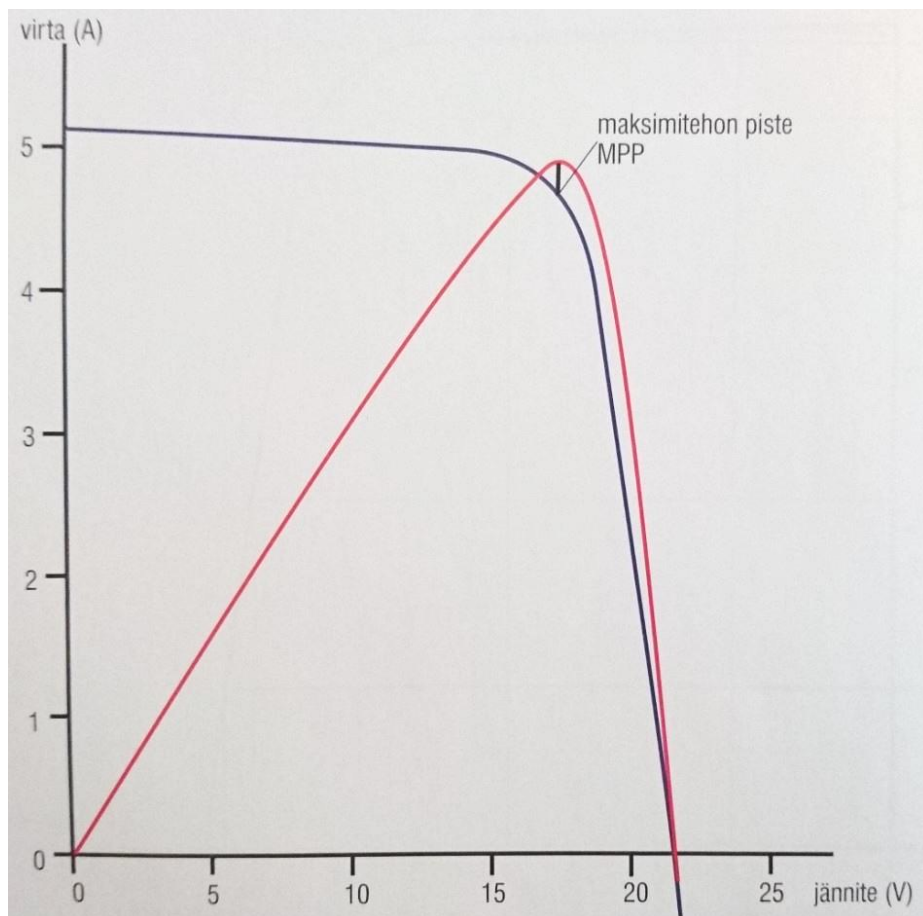
$$P = U \cdot I \quad (1)$$

jossa	$P$	teho	[W]
	$U$	jännite	[V]
	$I$	virta	[A]



Kuva 9. Esimerkki aurinkopaneelin ominaiskäyrästä (Perälä 2017, 49)

12 voltin jännitteellä kuormitettaessa teho on:  $12V \cdot 5A = 60W$ . Jos kuormitusjännite nousee 21,8 volttiin, on teho enää:  $21,8V \cdot 1A = 21,8W$ . Esimerkki laskuista huomataan, että aurinkopaneelin tuottama teho vaihtelee kuormituksen mukaan, vaikka auringon säteilyn määrä pysyisi samana. Kyseisessä esimerkissä suurimman tehon piste (kuva 10) saavutetaan kuormittamalla paneelia 17,4 voltilla, jolloin tehoksi saadaan:  $17,4V \cdot 4,7A = 81,8W$ . Tämä kohta ominaiskäyrällä on MPP (Maximum Power Point). (Perälä 2017, 48-51.)



Kuva 10. Aurinkopaneelin ominaiskäyrän suurimman tehon piste (Perälä 2017, 50)

Inverttereissä on MPPT-ohjelma (Maximum Power Point Tracking), joka pyrkii kuormittamaan paneeleita optimaalisella jännitteellä ja siten saavutetaan paras tuotantoteho eri lämpötiloissa ja vaihtelevalla auringon säteilyn määrällä. Invertterissä voi olla myös useita MPPT:tä. Esimerkiksi jos paneelit asennetaan katon itä- ja länsipuolelle, kytketään molempien puolien paneeliketjut eri MPPT:lle, jolloin voidaan hyödyntää itäpuolen tuotto aamuisin ja länsipuolen tuotto iltapäivisin. (Mäkinen 2017b, 11.)

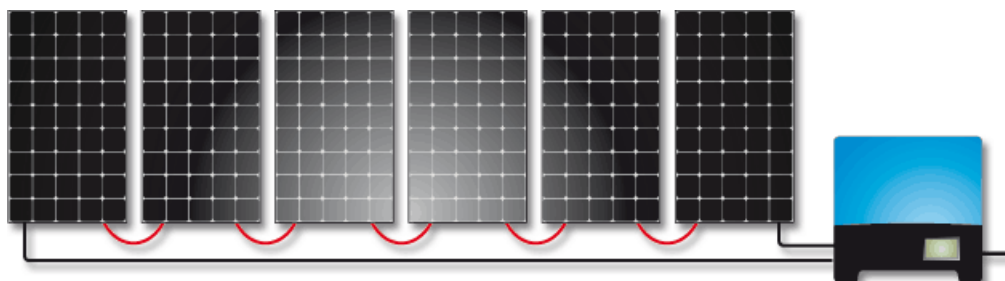
#### 4.5 Invertterien asennus Suomessa

Suomen sääolojen takia invertterien asennuspaikka ei ole vakiintunut. Niitä voidaan asentaa niin sisä- kuin ulkotiloihin. Useimpien invertterien alhaisin toimintalämpötila on  $-25^{\circ}\text{C}$ , jonka alittuessa se ei enää käynnisty. Toisaalta invertterin toimiessa syntyy hukkalämpöä, joten sisätiloissa tulee jäähdytys ottaa huomioon, eikä niitä saa asentaa esimerkiksi liian lähelle toisiaan – jos järjestelmään kuuluu useita inverttereitä – tai upottaa rakennuksen rakenteisiin. Jos invertteri asennetaan ulos, pyritään välttämään suoraa auringonpaistetta, ettei lämpötila ylitä maksimilämpötilaa, joka voi olla esimerkiksi  $55^{\circ}\text{C}$ . (Mäkinen 2017a.)

Jokisen (2017) mukaan yleisimpiä asennuspaikkoja ovat suojaisat lämmittämättömät paikat rakennusten ulkopuolella, esimerkiksi autokatos. Suuremmissa järjestelmissä ne pyritään sijoittamaan mahdollisimman lähelle paneeleita kaapeloinnin minimoimiseksi.

#### 4.6 String invertterit

Jokisen arvion mukaan string inverttereiden osuus on noin 90 prosenttia Suomessa käytetyistä verkkoinverttereistä (2017). Pientaloissa niiden toiminta perustuu useimmiten sarjaan kytkettyihin paneeleihin (kuva 11), joista muodostuu esimerkiksi 12 paneelin ketju (string). Se kytketään suoraan invertterin DC-tulonapoihin tai DC-turvakytkimeen.

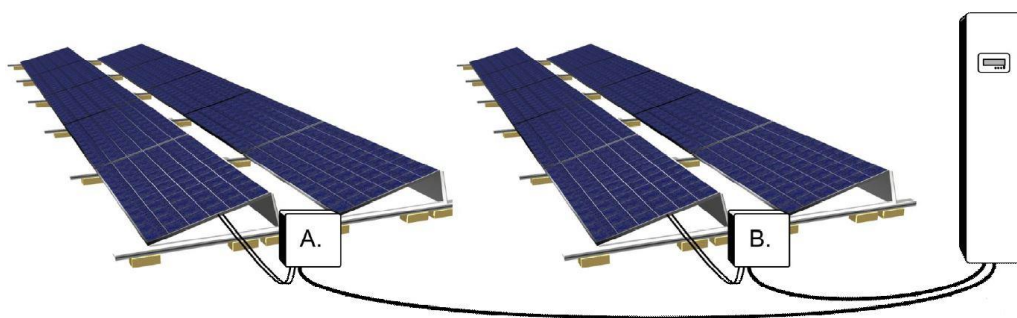


Kuva 11. String invertterin kytkentä 6 paneelilla (A typical Solar PV Array with central power management 2017)

String inverttereitä on 1- ja 3-vaiheisia. Käytännössä alle 3 kilopiikkiwatin järjestelmät toteutetaan yksivaiheisilla inverttereillä ja sitä suuremmat kolmivaiheisilla (Tahkokorpi 2016, 144.) Sähköverkkoyhtiöt vaativat, että vinokuorma vaiheiden välillä ei saa ylittää 16 ampeeria, jonka takia Suomessa 1-vaiheisen invertterin suurin mahdollinen teho on 3,6 kilopiikkiwattia. Suuremmat järjestelmät suositellaan toteutettavan saman invertterikoon moninkerralla, jolloin esimerkiksi viallisen invertterin korvaaminen vaihtolaitteella tai järjestelmän tehon nostaminen on helpompaa. (Mäkinen 2017b, 15, 24.)

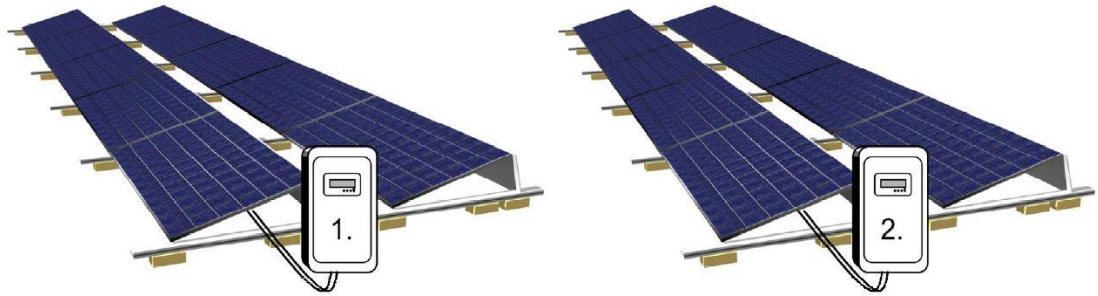
Kolmeen vaiheeseen kytketystä aurinkopaneelistosta saadaan suurempi hyöty, kun tuotettua sähköä voidaan käyttää kaikissa kohteen sähkölaitteissa (Tahkokorpi 2016, 144-145). Toisaalta, jos pientalossa käytetään esimerkiksi päiväsaikaan ilmalämpöpumppua jäähdytykseen, voidaan yksivaiheisen invertterin tuotto ohjata pumpulle ja siten hyödynnetään mahdollisimman suuri osuus tuotetusta sähköstä (Mäkinen 2017b, 15).

Suuremmissa kohteissa string inverttereiden kytkentä voidaan tehdä kahdella eri tavalla. Keskitetyssä topologiassa (kuva 12) paneeliketjut kytketään DC-kytkentäkoteloihin pienemmällä kaapelilla ja edelleen kotelosta invertterille poikkipinta-alaltaan suuremmilla kaapeleilla. Yhteen DC-kytkentäkoteloon voidaan kytkeä jopa 24 kappaletta paneeliketjuja. Keskitetyssä topologiassa loistehoa on mahdollista kompensoida myös silloin, kun auringon säteilyä ei ole. Tyypillisesti kyseisellä tekniikalla toteutetaan yli 1000 kilopiikkiwatin aurinkosähkövoimalaitoksia.



Kuva 12. Keskitetty topologia (Mäkinen 2017b, 8)

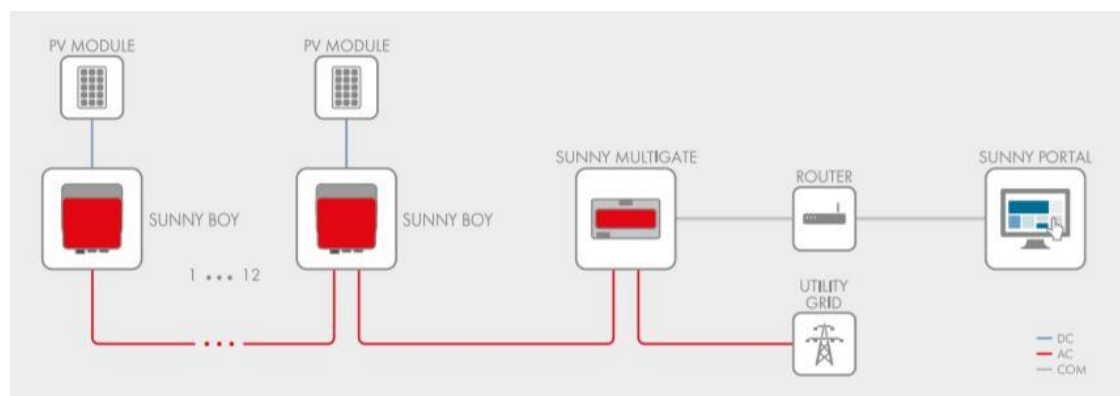
Hajautetussa topologiassa (kuva 13) paneeliketjut kytketään suoraan pieniin string inverttereihin (6 – 100 kW). Kyseisellä tekniikalla voidaan toteuttaa jopa 30 megapiikkiwatin aurinkosähkövoimaloita, mutta tyypillisesti ne ovat 100 – 2000 kilopiikkiwattia. Haittapuolena voidaan pitää muun muassa pitkiä AC-kaapelointivälejä inverttereiltä muuntamolle. (Mäkinen 2017b, 6-8.)



Kuva 13. Hajautettu topologia (Mäkinen 2017b, 7)

#### 4.7 Mikroinvertterit

Mikroinverttereillä toteutetussa järjestelmässä (kuva 14) jokaiseen paneeliin kytketään oma pieni vaihtosuuntaaja. Silloin paneelit eivät ole riippuvaisia toisistaan, vaan jokainen paneeli voi tuottaa maksimitehollaan. Esimerkiksi yhden paneelin varjostuminen vaikuttaa vain sen paneelin tuottoon, eikä koko järjestelmän. Toisaalta järjestelmän hinta on korkeampi, koska jokaiselle paneelille hankitaan oma invertteri ja myös järjestelmän huoltovarmuus heikenee komponenttien lisääntyessä. (Perälä 2017, 81.)



Kuva 14. SMA:n Sunny Boy -mikroinvertterien kytkennän periaatekuva (Sunny Boy 240 2014)

ABB:n mikroinverttereitä on saatavilla 250 ja 300 watin tehoisina, kun SMA:n mikroinvertteri on maximitelholtaan 230 wattia. Inverttereiltä tulevat AC-johtimet yhdistetään tyypillisesti kytkentäkotelossa yhdeksi johtimeksi, jolla järjestelmä kytketään sähkö- ja kiinteistöverkkoon. SMA:n mikroinverttereiden yhteydessä on mahdollista hankkia Multigate-tuote, johon kaikki mikroinvertterit kytketään. Multigate yhdistää invertterien AC-johtimet, mutta sisältää myös erilaisia tuotonseurantaohjelmia, joita voi käyttää esimerkiksi matkapuhelimella.

ABB:n mikroinverttereillä voi käyttää esimerkiksi jakorasiaa inverttereiden AC-johtimien yhdistämiseen. Kyseisessä järjestelmässä jokainen invertteri lähettää langattomasti tietoja ABB:n CDD-laitteelle (Concentrator Data Device), jonka avulla voidaan seurata järjestelmän tuottoa. CDD on pakollinen, koska se toimii myös järjestelmän maasulun suojausena.

Mikroinverttereillä on käytännössä samat suojausominaisuudet kuin string inverttereilläkin. Toisin sanoen, jos invertteri menettää yhteyden sähköverkkoon, kytkeytyy se automaattisesti irti verkosta, jolloin myös AC-johtimet ovat jännitteettömiä. Mikroinverttereillä toteutettu järjestelmä on siten huomattavasti turvallisempi vaihtoehto, koska siinä käytettävät DC-kaapeloinnit jäävät vähäisiksi ja niissä on vaaraton tasajännite, eli vain yhden aurinkopaneelin jännite. DC-jännitteet eivät missään vaiheessa nouse yli 80 VDC, joten DC-valokaa-rien riski on minimaalinen. (Product manual MICRO-0.25/0.3/0.3HV-I-OUTD-US-208/240 2014, 8-44; Sunny Boy 240 2014.)

## **5 SÄHKÖVERKON TYÖTURVALLISUUS**

### **5.1 Takasyöttö**

Takasyötöllä tarkoitetaan pientuotannon syöttämää sähköä jakeluverkkoon sen ollessa jännitteetön, esimerkiksi vian takia. Laitteiston on kytkeydyttävä irti sähköverkosta jakeluverkon häiriötilanteessa, jolloin tarvitaan LoM (Loss of Mains) -suojaus. Se on yleensä toteutettu invertterin saarekekäytönesto toiminnolla. Jakeluverkossa työskenneltäessä vian aikana on erittäin tärkeää,

että jännitteetön kohde ei tule uudelleen jännitteelliseksi lähtöön kytketyn aurinkosähköjärjestelmän aiheuttamasta takasyötöstä. (Kauhaniemi ym. 2005, 161; Verkostosuositus YA9:13. 2016, 1, 4.)

Takasyöttö voi aiheuttaa monia ongelmia, joista tärkeimpänä voidaan pitää sähköverkonasentajien työturvallisuutta. ABB:n 3 kilowatin yksivaiheinen invertteri voi optimiolosuhteissa tuottaa jopa 15 ampeerin virran ja jännite on aina 230V vaihtojännite, joten pienenkin aurinkosähköjärjestelmän aiheuttama takasyöttö on hengenvaarallinen. Järjestelmä ei todennäköisesti pysty tuottamaan jatkuvasti tarpeeksi hyvälaatuista sähköä, joten takasyöttö LoM-tilanteessa voi myös rikkoa pienjännitelähtöön kytkettyjä herkimpiä sähkölaitteita. (Product Manual UNO-3.0-TL-OUTD 2015, 18; Kauhaniemi ym. 2005, 161-163.)

## **5.2 Takasyötön riskin minimoiminen**

Invertterin saareketoiminnon esto ja verkkokoodi estävät sen toiminnan LoM-tilanteessa, mutta sen lisäksi jokaisessa verkkoon kytketyssä järjestelmässä on oltava mekaaninen erotuskytkin (Mäkinen 2017b, 5). Suojausten lisäksi on tärkeää todeta jännitteettömyys aina kohteessa, jossa on mahdollisuus, että verkkoon on liittynyt pientuotantoa. Jos takasyöttöriski on olemassa, on myös pienjänniteverkossa työkohte mahdollisuuksien mukaan tarpeellista maadoittaa, niin tuotantolaitoksen kuin jakeluverkonkin puolelta.

Takasyötöstä varoittaminen on ensisijaisen tärkeää riskien minimoinnissa. Tuotantolaitos tulee merkitä asianmukaisesti jakeluverkon (kuva 15) ja tuotantolaitoksen (kuva 16) puolelta. Toisin sanoen kaikki paikat, jotka voivat tulla jännitteellisiksi tuotantolaitoksen takia, pitää merkitä varoituksilla takasyötöstä. (Verkostosuositus YA9:13. 2016, 4-5.)





Kuva 15. Esimerkki jakeluverkossa käytettävästä varoituskilvestä (Karvinen 2017)



Kuva 16. Esimerkki tuotantolaitoksen puolella käytettävästä varoituskilvestä (Mäkinen 2017b, 36)

### 5.3 Haittavaikutukset sähköverkkoon

Jakeluverkkoon liitetty aurinkosähköjärjestelmä voidaan kuvitella negatiiviseksi kuormitukseksi, eli se nostaa lähiseudun jännitettä käydessään. Johtolähtöjen loppupäässä sijaitsevan tuotantolaitoksen aiheuttama jännitteen nousu on yleensä myönteinen asia. Jos kuitenkin asennetun pientuotannon teho ylittää alueen kuormituksen, voi jännitteen nousu olla myös haitallista. (Lakervi & Partanen 2008, 211-212.)

Pientuotanto nostaa myös lähialueen oikosulkuvirtoja. Jos vikapaikan lähelle on liitetty esimerkiksi useita aurinkosähköjärjestelmiä, voi oikosulkuvirta nousta huomattavasti ja aiheuttaa verkon komponenttien termisten rajojen ylittymisen. Esimerkiksi kaapelijatkokset, muuntajat ja kytkinlaitteet voivat aiheuttaa ongelmia vikavirtojen kasvaessa. Ongelma voidaan ehkäistä parantamalla

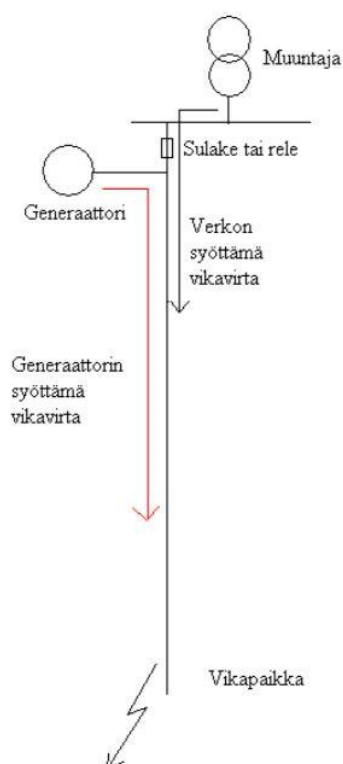


verkon komponentteja tai jakamalla verkko pienempiin osiin. (Verkostosuositus YA9:13 2017, 9-10.)

#### 5.4 Sähköverkon suojausongelmat

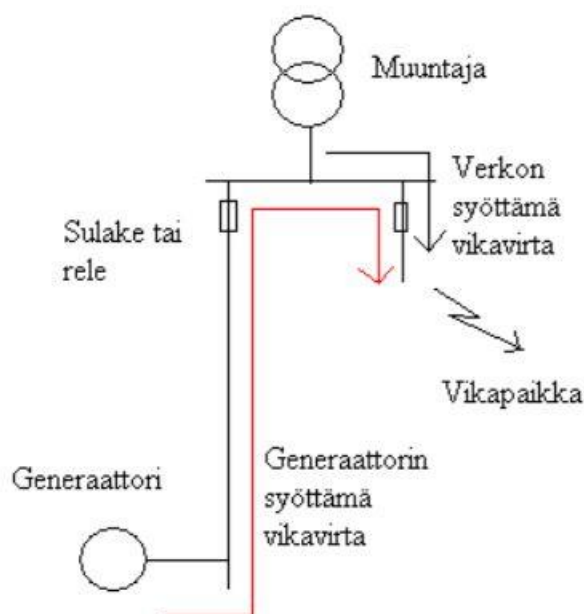
Pientuotanto voi aiheuttaa verkon suojauksiin kaksi tunnettua ongelmatausta. Kumpikaan ei ole todennäköinen tuotannon ollessa pientä ja korostuu erityisesti epätahtikoneita käytettäessä, koska ne pystyvät tuottamaan suuria oikosulkuvirtoja. Aurinkosähköjärjestelmien määrän kasvaessa voi kyseiset ongelmat kuitenkin tulla vastaan myös niiden kohdalla. (Verkostosuositus YA9:13 2017, 10.)

Pientuotannon tuottama vikavirta voi aiheuttaa verkon suojauksen sokaistumisen. Kuvassa 17 on esitetty teoreettisesti muuntajan johtolähdössä tapahtuva vika ja samaan lähtöön on kytketty pientuotantolaitos. Muuntaja syöttää vikavirtaa ja lähdön sulake on mitoitettu laukaisemaan sen mukaisesti. Pientuotantolaitos syöttää myös vikavirtaa, mutta rinnan jakeluverkon syöttämän vikavirran kanssa, mikä pienentää lähdön sulakkeen läpi kulkevaa oikosulkuvirtaa, jolloin se ei välttämättä laukea. (Shahzad ym. 2017, 628-630; Verkostosuositus YA9:13 2017, 11-12.)



Kuva 17. Suojauksen sokaistumisen periaatekuva, jossa pientuotantolaitoksen syöttämä vikavirta on merkitty punaisella (Verkostosuositus YA9:13 2017, 11)

Kuvassa 18 esitetään ongelmatilanne, jossa pientuotantolaitos voi aiheuttaa muuntajan lähdön suojauksen virheellisen laukaisun. Muuntajan toisessa lähdössä tapahtuu vika, jota kohti muuntaja alkaa syöttämään vikavirtaa. Pientuotantolaitos alkaa syöttämään vikavirtaa samaa lähtöä kohti. Jos voimalaitoksen tuottamaa oikosulkuvirtaa ei ole otettu suojauksessa huomioon ja se on tarpeeksi suuri, voi lähdön 1 sulakkeet laua virheellisesti, mikä voi aiheuttaa ongelmia esimerkiksi vian paikantamisessa. Tämä ongelma kohdistuu kuitenkin yleensä esimerkiksi tahtigeneraattoreihin, jotka voivat tuottaa jatkuvaa oikosulkuvirtaa. Aurinkosähköjärjestelmissä saareketoiminnon eston pitäisi estää kyseinen ongelma. Ongelma on ehkäistävissä myös käyttämällä ylivirtasuojausta, joka tunnistaa vikavirran suunnan. (Kauhaniemi ym. 2005, 161-163; Lakervi & Partanen 2008, 212; Verkostosuositus YA9:13 2017, 10.)



Kuva 18. Virhelaukaisun periaatekuva, jossa pientuotantolaitoksen syöttämä vikavirta on merkattu punaisella (Verkostosuositus YA9:13 2017, 10)

## 5.5 Verkkokoodi

Verkkokoodi on useista parametreista koostuva kokoelma, jotka määrittelevät, milloin invertteri voi kytkeytyä sähköverkkoon. Se asetetaan invertterin käyttöönoton yhteydessä tai pienemmissä järjestelmissä vähintään 24 tunnin kulluttua invertterin käyttöönotosta. Joissain inverttereissä voi suoraan valita maakohtaisen standardin SFS-EN 50438 mukaiset suojausasetukset. Myös

Saksan VDE-AR-N 4105 -mikrotuotantonormin määritellyt asetukset hyväksytään.

Energiateollisuuden teknisessä liitteessä on esitetty asetteluarvot (taulukko 1), jotka invertteriin asetetaan manuaalisesti tilanteessa, jossa maakohtaista standardia ei voida suoraan valita verkkokoodiksi. Laite kytkeytyy toimintaajan sisällä pois verkosta, jos mikä vaan asetteluarvoista ylittyy tai alittuu.

*Taulukko 1. Energiateollisuuden teknisen liitteen 1 asetteluarvot (Tekninen liite 1 Enintään 100 kVA tuotantolaitoksia koskevat tekniset vaatimukset, 2016)*

<b>Parametri</b>	<b>Toiminta-aika</b>	<b>Asetteluarvo</b>
Ylijännite	0,2 s	$U_n + 10 \%$
Alijännite	0,2 s	$U_n - 15 \%$
Ylitaajuus	0,2 s	51,5 Hz
Alitaajuus	0,2 s	47,5 Hz
Saarekekäyttö	enintään 5 s	

Verkkokoodin parametrit ovat käytännössä raja-arvot sähköverkon monitorointiin. Tyypillisessä tilanteessa aurinkopaneeleilta tuleva tasajännite ylittää ns. kynnysjännitteen eli invertterin vaatiman minimijännitteen, jonka jälkeen invertteri seuraa sähköverkon arvoja määrittelyn ajan. Jos arvot pysyvät aseteltujen parametrien mukaisina, invertteri tahdistuu verkkoon. (Mäkinen 2017b, 4; Tekninen liite 1 Enintään 100 kVA tuotantolaitoksia koskevat tekniset vaatimukset, 2016; Verkostosuositus YA9:13. 2016, 6.)

Aurinkoinsinöörien Thomas Lindnerin mukaan heiltä ostetut SMA:n invertterit ovat aina asetettu valmiiksi Suomeen sopivilla normeilla. Kuluttaja voi kuitenkin ostaa saman valmistajan tuotteen internetistä, joka voi olla esimerkiksi Italian ylijäämävarastoa ja siten siinä on todennäköisesti kyseisen maan normit oletusarvona.

Lindner myöntää, että sellaisia tapauksia on ollut, että invertteri on käynnistetty Suomeen sopimattomilla parametreilla ja pitääkin kyseisten tapausten riskiä jopa suurena johtuen enemmistä määrin internetistä ostettavista inverttereistä. Hänen mukaan sellaisessa tilanteessa ei kuitenkaan yleensä pääse

tapahtumaan mitään katastrofaalista, vaan tyypillisesti invertteri ei vain käynnisty, koska sähköverkon arvot eivät vastaa invertteriin aseteltuja parametreja. (Lindner 2017.)

## **5.6 Luvattomasti verkkoon kytketty järjestelmä**

Verkkoyhtiö antaa luvan sähköverkon kanssa rinnan käyvän tuotantolaitteiston kytkemiseen. Pientuotannon yleistyminen lisää riskiä luvattomasti verkkoon kytketyistä järjestelmistä. Verkonhaltija ei silloin tiedä esimerkiksi aurinkosähköjärjestelmän sijainnista tai suojauksista, jolloin muun muassa takasyötöstä varoittavat merkinnät puuttuvat jakeluverkosta. (Verkostosuositus YA9:13 2017, 1.)

Vantaan Energia Sähköverkot Oy:n käyttämät mittalaitteet mittaavat aina kaikki neljä tehonsuuntaa. Kaikista sähköverkkoon päin syöttäneistä mittalaitteista ajetaan viikoittain raportti, josta luvattomasti verkkoon kytketty aurinkosähköjärjestelmä voidaan havaita. Vantaalla on ollut muutamia yksittäistapauksia, joissa verkkoon on kytketty luvattomasti tuotantolaitteita. Nämä tapaukset ovat selvinneet edellä mainituista raporteista. Näissä tilanteissa asiakkaan on poistettava laitteisto tai estettävä sähkönsyöttö verkkoon päin, kunnes järjestelmän kytkentään on saatu lupa verkkoyhtiöltä. (Flink 2017.)

## **5.7 Haastattelut**

Opinnäytetyötä varten haastateltiin kahta Vantaan Energia Sähköverkot Oy:n kytkijää, joita aurinkosähköjärjestelmien aiheuttamat työturvallisuusriskit erityisesti koskettavat. He työskentelevät sähköverkossa ja kuuluvat siten riskiryhmään mahdollisen takasyötön osalta. Kytkijät myös käyvät lisäämässä varoitusmerkinnät jakeluverkkoon ja asentavat mahdollisen erotuskytkimen, jos kohdetta syötetään ilmajohdolla. Kysymyksien (liite 1) tarkoituksena oli selvittää sähköverkon asentajien näkökulmaa aurinkosähköjärjestelmien lisäämiin riskeihin, esimerkiksi takasyötön osalta.

Vantaan Energia Sähköverkot Oy:n kytkijöiden mukaan työturvallisuus on hyvällä tasolla aurinkosähköjärjestelmien osalta. Erotus voidaan aina tehdä jake-

luverkon puolelta luotettavasti, riippumatta siitä, syötetäänkö kohdetta ilmajohdolla vai maakaapelilla. Soininen kuitenkin huomauttaa, että järjestelmien liisääntyminen lisää vaaraa verkkoon ja asentajan tulee olla huolellinen. Vuori myös vahvistaa, että vaikka suojaukset järjestelmissä ovat hyvät, pitää mahdollisten laitevikojen takia olla varuillaan.

Kytäjöiden mielestä erilainen varoitusmerkintä sähköverkon puolella ei ole tarpeellinen, vaikka kohteessa olisi akkuja tai saarekekäytöllinen järjestelmä. Järjestelmien huomattava kasvu aiheuttaa kuitenkin Soinisen mielestä varoitusmerkintöjen toimivuudelle ongelmia. Määrätyillä alueilla asennettujen järjestelmien määrä laajenee niin paljon, että jakokaapit alkavat olla käytännössä täynnä varoitusmerkintöjä. Hänen mukaan varoitusmerkinnät voivat alkaa menettää merkitystään.

Jos aurinkosähköjärjestelmästä on ilmoitettu verkkoyhtiölle asianmukaisesti, on siitä varoitusmerkinnät, joten se erotetaan aina verkosta ennen töiden aloitusta. Luvattomien järjestelmien osalta molemmat kytäjät vahvistavat, että jokainen kohde todetaan jännitteettömäksi ennen töiden aloitusta, myös takasyötön osalta. Joten luvattomasti verkkoon kytketty järjestelmä pystytään viimeistään silloin havaitsemaan, eikä vaaratilannetta pääse syntymään. Haastatteluiden perusteella voidaan todeta, että sähköverkonasentajien työtavat ja turvallisuusjärjestelyt ehkäisevät vaaratilanteet luotettavasti. (Soininen 2017; Vuori 2017.)

## 6 PALOTURVALLISUUS

Keski-Uudenmaan pelastuspäällikkö Jorma Alhon mukaan palomiehillä ei ole erityisiä ohjeita aurinkosähköjärjestelmän omaavan kohteen sammutukseen. Niihin suhtaudutaan kuin jännitteelliseen kohteeseen yleensä, muun muassa pitämällä tarpeeksi pitkä turvaetäisyys. Alhon tietoon ei ainakaan vielä ole tullut tapausta, jossa aurinkopaneelisto olisi palanut. Kyseessä on pelastushenkilökunnalle uutta tekniikkaa, ja hän vahvistaakin, että olisi hyvä tietää etukäteen mitä voidaan tehdä, ennen kuin tilanne tulee eteen. (Alho 2017.) Aurinkoinsinöörien Thomas Lindner (2017) muistuttaa, että yksikään palomies ei kuitenkaan vielä ole kuollut aurinkopaneeleista saadun sähköiskun takia.

## 6.1 Aurinkopaneelien jatkuva jännite

Aurinkopaneelien sähköntuotanto ei lakkaa, vaikka invertterin automatiikka kytkisi sen irti verkosta esimerkiksi sähkökatkon aikana. Aurinkopaneelistossa ja invertterille johtavissa DC-kaapeleissa voi silti olla 200 - 1000 voltin tasajännite. Esimerkiksi tyypillisessä 12 paneelin sarjaan kytkennässä 32 voltin paneeleilla syntyy noin 384 voltin tasajännite optimaalisissa olosuhteissa. Pienoisjännitteen raja on 120 VDC, joten pienimmissäkin järjestelmissä on todennäköisesti hengenvaarallinen tasajännite. Paneelisto voi tuottaa vaarallisen jännitteen myös pilvisissä olosuhteissa. (Käpylehto 2016, 141-142; Mäkinen 2017b, 5.)

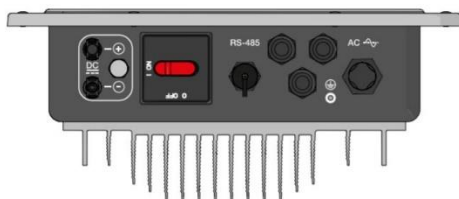
## 6.2 DC-turvakytkin

DC-turvakytkin ei ole pakollinen Suomessa, mutta käytännössä lähes aina se jollain tavalla järjestelmästä löytyy (Jokinen 2017). Jukka Mäkisen (2017) mukaan ABB ei käytännössä toimita Suomeen kuin DC-turvakytkimellä varustettuja inverttereitä. Aurinkoinsinöörien Thomas Lindner (2017) myös vahvistaa, että kaikissa heidän Suomeen myymissään SMA-inverttereissä on DC-turvakytkin.

DC-turvakytkin katkaisee invertterin DC-puolen syötön, eli tasasähkön muuntaminen vaihtosähköksi lakkaa. Se ei kuitenkaan katkaise paneelien toimintaa. (Lindner 2017.) Turvakytkin katkaisee paneelien ja invertterin välisen virtapiirin, mutta DC-kaapeleissa on silti jännite. Invertteriä huollettaessa voidaan esimerkiksi kääntää DC-turvakytkin OFF-asentoon ja siten invertteri on kokonaan jännitteetön. (PV Systems Simplified 2011.)

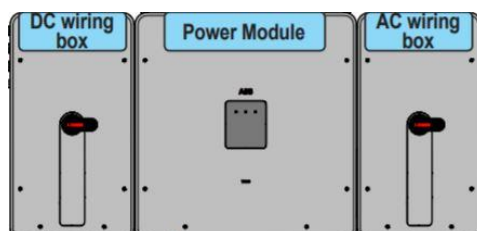
DC-kytkin perustuu yleensä riittävän ilmvälän luomiseen kontaktien välille ja mahdollisimman nopeasti. Kun kytkin avataan, syntyy kontaktien välille valokaari, joka ilmvälän kasvaessa pitenee ja samalla jäähtyy. Valokaaren pidentyessä myös resistanssi kasvaa, joka pienentää valokaaren virtaa. Lämpötila valokaarella voi olla jopa 20 000 kelviniä, joten sen nopea sammutus on tärkeää turvallisuuden kannalta. (Disconnect switches in photovoltaic applications 2009, 4-5.)

ABB:n yleisimpien invertterimallien DC-turvakytkimet sijaitsevat invertterin alaosassa (kuva 19) 3-45 kWp:n järjestelmissä.



Kuva 19. Punainen kytkin invertterin pohjassa on DC-turvakytkin pienemmissä järjestelmissä (Product Manual UNO-3.0-TL-OUTD. 2015, 15)

Suuremmissa, esimerkiksi 50-60 kWp:n järjestelmässä se on toteutettu DC-kytkentäkotelon kannessa olevalla kahvalla (kuva 20).



Kuva 20. Kahvallinen DC-turvakytkin (Product manual TRIO-50.0-TL-OUTD. 2017, 14)

### 6.3 PVStop

Australialainen Solar Developments Pty Ltd on kehittänyt tuotteen, jonka avulla aurinkopaneelit voi tehdä vaarattomaksi sekunneissa. PVStop on saatavilla tyypillistä vaahtosammutinta muistuttavassa ruiskutuspullossa (kuva 21), joka esimerkiksi palokunnan on helppo pitää mukana. Tuote on muun muassa saanut EU:n ETV-sertifikaatin (Environmental Technology Verification), joka on lähinnä pienyrittäjille tarkoitettu todistus toimivuudesta ja yhteiskunta-hyödyllisestä tuotteesta. PVStop on kirjoittamishetkellä Lontoon palokunnalla testikäytössä. (Foran 2017.)



Kuva 21. PVStop sumutuspullo (PVStop – fire retardant solution for PV solar panels)

Toiminta perustuu yksinkertaisuudessaan siihen, että ruiskutettava polymeerikalvo ei läpäise auringon säteilyä ja aurinkopaneelin sähköntuotto lakkaa lähes kokonaan – tai ainakin jännite putoaa niin pieneksi, ettei siitä ole vaaraa. Ruiskutettava kalvo on palamatonta, ja sillä voidaankin sammuttaa samalla palava aurinkopaneeli.

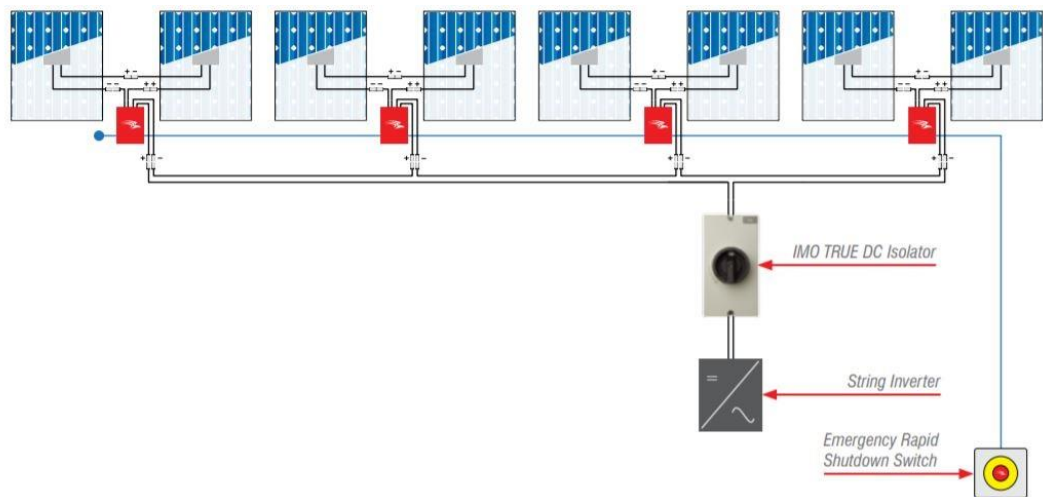
Riittää, että paneelista peitetään 25 prosenttia polymeerikalvolla, jotta sen sähköntuotanto putoaa lähes nollaan. Tässä tilanteessa ainetta pitää ruiskuttaa paneelin keskialueelle viivamaisesti. Valmistaja suosittelee kuitenkin peittämään paneelit kokonaan, jotta voidaan varmistua aurinkopaneelien jännitteettömyydestä. Kalvo kiinnittyy myös märkään paneeliin.

PVStopilla ruiskutettu kalvo ei riko aurinkopaneeleita. Se voidaan kuivumisen jälkeen kuoria paneelin päältä ilman työkaluja ja hävittää normaaliin yhdyskuntajätteeseen. (PVStop – fire retardant solution for PV solar panels 2017.)

#### 6.4 Paneeliston erottimet

ABB:n tuotepäällikkö Jukka Mäkinen arvioi, että tulevaisuudessa ainakin suurempiin aurinkosähköjärjestelmiin tulee pakolliseksi asentaa etäohjattavat turva-erottimet (2017b, 5). Esimerkiksi IMO:n valmistama FireRaptor -aktiivikomponentti toimii suojausmenetelmänä kaikissa vaaratilanteissa. Erotin kytetään kahden aurinkopaneelin väliin (kuva 22).





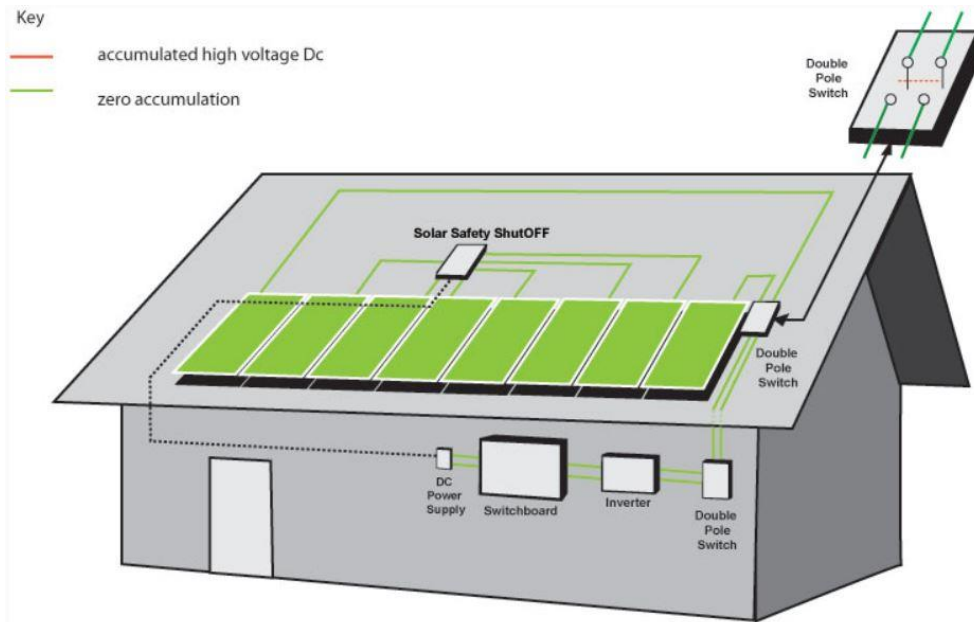
Kuva 22. FireRaptor -erottimien toimintaperiaate (FireRaptor Solar Panel Rapid Shutdown Solution 2017)

FireRaptor -erottimet voidaan avata manuaalisesti hätäpainikkeella, joka on yhteydessä kaikkiin erottimiin erillisellä 24 VDC -johtimella. Hätäpainike voidaan sijoittaa mihin vaan erillisen kaapeloinnin takia.

Jokaisessa FireRaptor -erottimessa on myös oma lämpöanturinsa. Erottimet avautuvat, jos lämpötila ylittää 85°C ja kytkeytyvät takaisin kiinni, kun lämpötila laskee jälleen alle raja-arvon. Jos lämpötila ylittää 92°C, ei automaattinen jälleenkytkentä enää toimi, vaan järjestelmä täytyy manuaalisesti resetoida hätäpainikkeella.

FireRaptor -erottimet avautuvat automaattisesti myös tilanteessa, jossa invertterin yhteys jakeluverkkoon katkeaa. Tilanne voi olla esimerkiksi tyypillinen sähkökatko tai jos jokaisessa järjestelmässä pakollinen AC-turvakytkin käännetään OFF-asentoon. (FireRaptor Solar Panel Rapid Shutdown Solution 2017.)

Toinen vastaava tuote on RSI (Remote Solar Isolator). Se perustuu myös aurinkopaneelien sarjakytkenän avaamiseen, mutta kaikki paneelit kytketään yhteen kytkentäkoteloon, jossa myös erotus tapahtuu (kuva 23). Tekniikka on muuten hyvin samanlainen; erotusvälit avautuvat, jos kytkentäkotelon jännite lakkaa ja siinä on myös lämpöanturi automaattiselle erotukselle tulipalotilanteessa. (How it works – The Solar Safety ShutOFF explained 2017.)



Kuva 23. RSI-toimintaperiaate (How it works – The Solar Safety ShutOFF explained, 2017)

Molemmat tuotteet ovat helppoja asentaa, myös jälkeenpäin. Eivätkä tuotteiden hinnat ole kovin suuria.

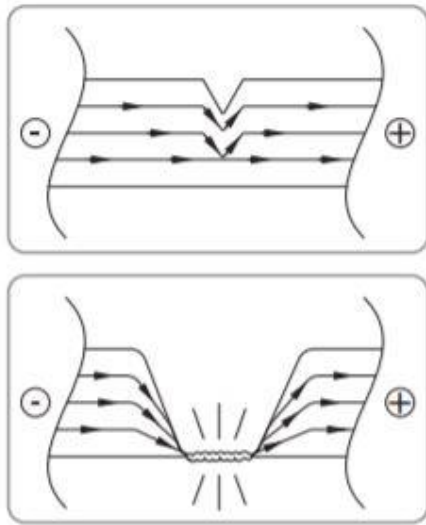
## 6.5 DC-valokaaret

Muun muassa Yhdysvalloissa noudatettavan NEC:n (National Electric Code) kohdassa 690.11 määritellään DC-valokaarisuojaus pakolliseksi kiinteistön yhteyteen asennettaviin uusiin yli 80 VDC -aurinkosähköjärjestelmiin. Se on ylimääräinen suojaus, joka asennetaan yleensä invertteriin, mutta voidaan asentaa myös erikseen. Esimerkiksi SMA America on kehittänyt erillisen malliston, joissa on AFCI-suojaus (Arc Fault Circuit Interrupter) integroituna invertteriin. NEC:n määrittämässä standardissa suojaus kohdistuu ns. sarjavalokaariin.

Kuvassa 24 on esitetty esimerkkutilanne valokaaren synnystä johtimissa, mutta valokaari voi muodostua myös esimerkiksi huonon liitoksen välille. Ylempää kuvassa on vaurioitunut johdin. Sen virrantiheys kasvaa vaurion takia ja siten myös lämpötila nousee, joka johtaa lopulta johtimen sulamiseen vauriokohdasta.

Alemmassa kuvassa johdin on sulanut ja muodostuu ilmapäli. Syntyy kipinä, joka ionisoi ilmapälin, jolloin muodostuu plasmää. Jos virta on tarpeeksi suuri,

syntyy tarpeeksi plasmaa, jonka kautta virta pääsee taas johtumaan. Plasma on silminnähtävissä oleva valokaari.



Kuva 24. Esimerkki sarjavalokaaren syntymisestä DC-johtimissa (PV Arc-Fault Circuit Interrupter 2012)

Suojaus havaitsee valokaaren ja katkaisee virran kulun välittömästi, jolloin valokaari sammuu. Standardissa myös määritellään, että valokaaren havaitessa pitää käyttäjälle tulla siitä visuaalinen ilmoitus ja järjestelmän voi käynnistää uudelleen vain manuaalisen resetoinnin jälkeen. (PV Arc-Fault Circuit Interrupter 2012.)

Toinen tulipalojakin aiheuttanut tilanne on ns. rinnakkaisvalokaaret, joita voi muodostua, kun DC-kaapeloinnin eristeet pettävät. Se voi johtua esimerkiksi: eläinten pureskeltua niitä, haurastumisen takia tai vaikka kosteuden päästyä johtimeen. Positiiviset ja negatiiviset DC-kaapelit kulkevat yleensä lähellä toisiinsa, ja kun eristeet pettävät, muodostuu johtimien välille valokaari.

Rinnakkaisvalokaarien suojausta ei ole määritelty NEC:n standardissa. Niiden sammuttaminen vaatii johtimien oikosulkemisen, jolloin jännite tippuu lähes nolnaan volttiin. Sammutuksessa on huomioitava, että suojauksen pitää kestää järjestelmän muodostama oikosulkuvirta. (DC Arc Faults and PV System Safety 2009.)

## 7 KEHITYSIDEAT

Vantaan Energia Sähköverkot Oy:n asentajien työtavat ovat hyvällä tasolla. Aurinkosähköjärjestelmien erotus ennen töiden aloitusta on rutinoitunutta ja luovattomatkin järjestelmät todennäköisesti huomataan viimeistään kohteessa. Aurinkosähköjärjestelmien lisääntyminen ja niiden aiheuttamat riskit tulee kuitenkin ottaa työturvallisuuskoulutuksissa huomioon ja lisätä erityisesti uusien sähköverkon asentajien koulutukseen. Myös urakoitsijoiden työturvallisuutta voidaan parantaa, esimerkiksi varoittamalla etukäteen, jos työkohte sijaitsee alueella, jossa on useita asennettuja aurinkosähköjärjestelmiä.

Jos kohteessa on järjestelmä, joka mahdollistaa saarekekäytön tai käytössä on akkuja, tulisi siitä olla oma varoitusmerkintänsä, tai esimerkiksi erilainen dokumentointi verkkoyhtiön karttajärjestelmissä. Vaikka saareke on selkeästi erotettu jakeluverkosta, on tärkeä tietää, että kyseisessä kohteessa on todennäköisesti jännite, vaikka muu osa verkosta on jännitteetön. Normaalitytilanteessa asialla ei ole välttämättä merkitystä, mutta esimerkiksi myrsky tai muu poikkeustilanne voi aiheuttaa poikkeusmenettelyjä, jolloin on tärkeä olla tietoinen mahdollisista riskeistä.

Asennettujen järjestelmien lukumäärän kasvaessa voi tulevaisuudessa tulla tilanne, jossa kohteista myös poistetaan aurinkosähköjärjestelmiä tai niihin tehdään muutoksia. Verkkoyhtiö voisi toteuttaa esimerkiksi vuoden välein kyselyn kaikilta pientuottajilta, että onko järjestelmä yhä toiminnassa ja onko siihen tehty jotain muutoksia.

Tutkimuksesta käy ilmi, että paloturvallisuudessa on kehitettävää. Verkkoyhtiölle se ei välttämättä aiheuta toimia, mutta aurinkosähköjärjestelmän palaessa ei välttämättä laitteen asennuksesta vastaavaa henkilöä saada sillä hetkellä kiinni. Joten on mahdollista, että asiasta soitetaan verkkoyhtiön päivystykseen. Kyseiseen tilanteeseen on hyvä laatia etukäteen selkeät ohjeet esimerkiksi pelastushenkilökunnan neuvomiseen, jotta välttyään vaaratilanteilta.

## 8 POHDINTA

Aurinkosähköjärjestelmät eivät aiheuta suurta riskiä sähköverkon asentajille. Invertteri pystyy LoM-tilanteessa erottamaan itsensä verkosta viidessä sekunnissa. Vaikka suojaus pettäisi, on AC-turvakytkin käännettävissä, jolloin erotus voidaan tehdä manuaalisesti. Takasyöttöä ei kuitenkaan pidä väheksyä pienjänniteverkossakaan, eli työmaadoitukset ja jännitteettömyyden toteaminen ovat ainoita varmoja tapoja turvalliseen työskentelyyn verkossa, jossa on takasyötön vaara.

Tilanne, jossa verkkoyhtiö ei ole tietoinen aurinkosähköjärjestelmästä, on kaikkein vaarallisin. Mittalaitteiden raporteista selviävä luvaton syöttö verkkoon on havaittavissa viikoittain, joten riski, että pientuotantoa olisi verkkoyhtiön tietämättä pitkään, on erittäin pieni. Lyhyen ajan sisällä on silti mahdollista, että verkossa on kytketty takasyöttöä aiheuttava järjestelmä, josta sähköverkonasentaja ei ole etukäteen tietoinen. Jännitteettömyys tulee siis aina todeta mahdollisen takasyötön varalta ennen töiden aloitusta, vaikka takasyötöstä ei olisi kohteessa varoituksia.

Huolestuttavana ajatuksena voidaan pitää inverttereiden asentamista väärillä verkon asetteluarvoilla. Vaikka riski on pieni, että invertteri edes käynnistyy, voi sen teoreettisesti ajatella olevan mahdollista. Kyseisessä tilanteessa saarekekäytönesto ja muut suojaukset eivät toimisi oikein.

Verkon suojauksien osalta myös pienet aurinkosähköjärjestelmät on otettava huomioon. Vaikka yhden järjestelmän vaikutus on hyvin pieni, voi nykyisellä kasvuvauhdilla yhden muuntajan lähdeissä olla tulevaisuudessa jo useita aurinkosähköjärjestelmiä, joista voi yhdessä koostua merkittäviäkin vaikutuksia esimerkiksi alueen oikosulkuvirtoihin.

Aurinkosähköjärjestelmistä on yleisesti tiedossa, että laitteistoa ei todennäköisesti saada täysin jännitteettömäksi kuin peittämällä paneelit tai rikkomalla ne. Kuitenkin yhden paneelin tuottama jännite on vaaraton, joten työssä tutkitut erotuskytkimet olisivat edullinen ja luotettava tapa tehdä järjestelmä turvallisiksi. Jopa laitevalmistajatkin ovat valmistautuneet, että tulevaisuudessa kyseiset komponentit ovat pakollisia asentaa.

## LÄHTEET

A typical Solar PV Array with central power management. 2017. Ausind Solar Intl. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.ausindsolar.com.au/solar-products/micro-inverter/> [viitattu: 31.10.2017]

Alho J. 2017. Pelastuspäällikkö. Haastattelu 11.10.2017. Keski-Uudenmaan pelastuslaitos.

BU-304a: Safety Concerns with Li-Ion. 2017. Battery university. WWW-dokumentti. Päivitetty: 8.6.2017. Saatavissa: [http://batteryuniversity.com/learn/article/safety\\_concerns\\_with\\_li\\_ion](http://batteryuniversity.com/learn/article/safety_concerns_with_li_ion) [viitattu: 8.10.2017]

DC Arc Faults and PV System Safety. 2009. Renewable Energy World. WWW-dokumentti. Päivitetty 7.12.2009. Saatavissa: <http://www.renewableenergyworld.com/articles/2009/12/dc-arc-faults-and-pv-system-safety.html> [viitattu: 20.10.2017]

Disconnect switches in photovoltaic applications. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://library.e.abb.com/public/b4c77914e629961a8525765e0064e264/1SXU301197B0201.pdf> [viitattu: 20.10.2017]

FireRaptor Solar Panel Rapid Shutdown Solution. 2017. IMO. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.cclcomponents.com/attachments/file/download/id/7214/> [viitattu: 11.10.2017]

Flink A. 2017. Mittauspalvelun esimies. Sähköposti 17.11.2017. Vantaan Energia Sähköverkot Oy.

Foran J. 2017. Toimitusjohtaja. Sähköposti 11.10.2017. PVStop.

Jokinen J. 2017. Aurinkosähköjärjestelmän toimitus. Seminaari Jyväskylässä 5.10.2017.

Käpylehto, J. 2016. Auringosta sähköt kotiin, kerrostaloon ja yritykseen. Helsinki: Into Kustannus Oy.

Karvinen A. 2017. Liittymäpalveluasiantuntija. Sähköposti 27.10.2017. Vantaan Energia Sähköverkot Oy.

Kauhaniemi K., Kumpulainen L. & Buchanan P. 2005. Impact of Distributed Generation. Electric Energy T&D Magazine. Tieteellinen julkaisu. Saatavissa: <http://www.electricenergyonline.com/page.php?page=magazine&ID=22> [viitattu: 29.10.2017]

Lakervi E. & Partanen J. 2008. Sähkönjakelutekniikka. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press / Otatieto.

Lindner T. 2017. Toimitusjohtaja. Haastattelu 16.10.2017. Aurinkoinsinöörit Oy.

Majuri J. 2017. Project Engineer. Sähköposti 17.11.2017. Naps Solar Systems Oy.

Mäkinen J. 2017a. PV-järjestelmien peruseriaatteen. Seminaari Jyväskylässä 5.10.2017.

Mäkinen, J. 2017b. Aurinkosähkö osana energiamurrosta PV-voimalan suunnittelijan opas suunnittelu – toteutus – ylläpito. 2017. Suunnitteluopas.

Perälä, R. 2017. Aurinkosähköä. Helsinki: Alfamer / Karisto Oy.

Polycrystalline Silicon Cells: production and characteristics. 2012. Sinovoltaics. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://sinovoltaics.com/learning-center/solar-cells/polycrystalline-silicon-cells-production-and-characteristics/> [viitattu: 20.10.2017]

Product manual MICRO-0.25/0.3/0.3HV-I-OUTD-US-208/240. 2014. ABB-PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://library.e.abb.com/public/f398eca735f13f34c1257cec00364cad/MICRO-0.25-0.3-0.3HV-I-OUTD-US%20product%20manual%20rev%20na%201.1.pdf> [viitattu: 25.10.2017]

Product manual TRIO-50.0-TL-OUTD. 2017. ABB. PDF-dokumentti. Päivitetty: 08.09.2017. Saatavissa: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=M000035&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch> [viitattu: 20.10.2017]

Product Manual UNO-3.0-TL-OUTD. 2015. ABB. PDF-dokumentti. Päivitetty: 12.10.2015. Saatavissa: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=M0000027G&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch> [viitattu: 20.10.2017]

PV Arc-Fault Circuit Interrupter. 2012. SMA-America. PDF-tiedosto. Päivitetty: 13.09.2012. Saatavissa: [http://files.sma.de/dl/4246/AFCI\\_WHITEPA-PER\\_UUS130912.pdf](http://files.sma.de/dl/4246/AFCI_WHITEPA-PER_UUS130912.pdf) [viitattu: 20.10.2017]

PV Systems Simplified. 2011. Home Power. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.homepower.com/articles/solar-electricity/equipment-products/pv-systems-simplified> [viitattu: 20.10.2017]

PVStop – fire retardant solution for PV solar panels. 2017. PVStop. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.pvstop.com.au/products/> [viitattu: 11.10.2017]

Raassina A. 2017. Liittymäpalvelupäällikkö. Sähköposti 27.10.2017. Vantaan Energia Sähköverkot Oy.

Shahzad U., Kahrobaee S. & Asgarpoor S. 2017. PDF-dokumentti. Päivitetty: 21.9.2017. Protection of Distributed Generation: Challenges and Solutions. Saatavissa: [http://file.scirp.org/pdf/EPE\\_2017092016155049.pdf](http://file.scirp.org/pdf/EPE_2017092016155049.pdf) [viitattu: 31.10.2017]

Soininen M. 2017. Kytijä. Haastattelu 23.11.2017. Vantaan Energia Sähköverkot Oy.

Sunny Boy 240. 2014. SMA. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://files.sma.de/dl/18925/SB240-DEN1442web.pdf> [viitattu: 25.10.2017]

Tahkokorpi, M. 2016. Aurinkoenergia Suomessa. Helsinki: Into Kustannus Oy.

Technical Application Papers No.10 Photovoltaic plants. 2010. ABB. PDF-dokumentti. Saatavissa: <file:///C:/Users/JonnajaOsku/Downloads/Vol.10.pdf> [viitattu: 25.10.2017]

Tekninen liite 1 Enintään 100 kVA tuotantolaitoksia koskevat tekniset vaatimukset. 2016. Energiateollisuus. PDF-dokumentti. Päivitetty: 27.4.2016. Saatavissa: [https://energia.fi/files/1249/tekninen\\_liite\\_1\\_-\\_enintaan\\_100\\_kva\\_paivitetty\\_20160427.pdf](https://energia.fi/files/1249/tekninen_liite_1_-_enintaan_100_kva_paivitetty_20160427.pdf) [viitattu: 8.10.2017]

The Solar Safety ShutOFF explained. 2017. Remote Solar Isolator. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://remotesolarisolator.com/how-it-works/> [viitattu: 11.10.2017]

Verkostosuositus YA9:13. 2016. Energiateollisuus. Päivitetty: 27.4.2016. Saatavissa: [https://energia.fi/files/762/Mikrotuotannon\\_liittaminen\\_sahkonjakelu-verkkoon\\_YA9\\_13\\_verkostosuositus\\_paivitetty\\_20160427.pdf](https://energia.fi/files/762/Mikrotuotannon_liittaminen_sahkonjakelu-verkkoon_YA9_13_verkostosuositus_paivitetty_20160427.pdf) [viitattu: 29.10.2017]

Vuori P. 2017. Kytkejä. Haastattelu 23.11.2017. Vantaan Energia Sähköverkot Oy.



## HAASTATTELUKYSYMYKSET

1. Aurinkosähköjärjestelmien määrä on kasvanut huomattavasti Vantaalla viimeisen kahden vuoden aikana. Onko tämän hetkiset toimenpiteet, esim. varoitusmerkinnät ja turvakytkin riittäviä verkkoon kytkettyjen aurinkosähköjärjestelmien osalta, vai lisäisittekö jotain?
2. Akut ovat toistaiseksi vielä harvinaisia aurinkosähköjärjestelmissä, mutta ne voivat tulevaisuudessa yleistyä, kun akkujen hinnat laskevat. Pitäisikö mielestänne kohteesta, jossa on akustoja käytössä, olla erilainen varoitusmerkintä verkon puolella?
3. Lyhyen ajan sisällä on mahdollista, että aurinkosähköjärjestelmä on kytketty verkkoon luvottomasti, eikä siitä ole tietoa verkkoyhtiöllä. Toteatteko aina jännitteettömyyden myös takasyötön varalta, vaikka siitä ei olisi varoituksia?
4. Oma mielipiteenne aurinkosähköjärjestelmien aiheuttamista työturvallisuusriskeistä?